

P-1/P-2 观测检验方案

预注册正式文件（冻结稿）

文件编号：LSU-P12-001

作者：王建明（乙舟）

日期：2026 年 8 月 29 日

状态：已冻结 · 不可修改

1 预注册声明

本文件在检验数据被调用前完成并冻结。其作用是：

若未来任何人主张“这个检验是看到数据后设计的”，本文件的存在即为反驳。

本文件冻结后，以下内容不可更改：

- 空洞参考方向的定义与冻结方式；
- 可操作性判据（特征值简并、几何病态、伪独立性）；
- 统计阈值；
- 失败判据；
- 数据来源；
- 双轨检验的强制报告要求；
- 相关噪声估计器的公式与代码版本。

任何偏离本文件的附加分析，必须单独标记为“探索性分析”，不计入正式结论。

2 检验目标

检验论文《宇宙作为一个高维发育系统的局部观测》（AiXiv 预印本，2026-08-29）中两条近端预测：

- P-1**：哈勃常数存在不小于 0.3% 的定向偶极，方向与 KBC 空洞几何相关；
- P-2**：CMB 与星系计数数据中的非运动学残余偶极方向，与 KBC 空洞几何方向相关。

3 核心几何量：空洞参考方向（双轴制）

3.1 定义数据源

使用本地星系密度场，不得使用：

- 本检验中用于 P-1 的超新星距离数据；
- 本检验中用于 P-2 的 CMB 或计数偶极数据。

推荐数据源：

- SDSS 主星系样本；
- 2MASS 全天星系巡天；
- DESI 红移巡天密度场重建。

3.2 双轴构造方法

红移范围 $0.01 < z < 0.05$ ；平滑尺度 $R_s = 50 h^{-1} \text{Mpc}$ 。在平滑后的密度场中：

1. **主轴** $\hat{v}_a$ ：计算密度场相对 KBC 空洞区域的位置二阶矩张量 $S_{ij} = \sum_k w_k r_i r_j$ (w_k 为欠密度权重)，取其最大特征值对应特征向量。该方向是“空洞长轴”的操作性定义，也是原预测的几何对象，作为主检验轴。注意：此处采用位置二阶矩张量而非力学惯性张量——后者的最大特征值方向垂直于长轴，不可混用；加权方案细节在冻结时写入附件 A 一并存档。
2. **参考轴** $\hat{v}_c$ ：定位空洞中心，定义 $\hat{v}_c$ 为从观测者指向空洞中心的方向。

两轴数值均保留 4 位小数，写入附件 A。

3.3 可操作性判据（执行次序冻结）

以下三道判据按本次序依次执行；任一环节触发终止，即记“方向未定义”，检验不执行。

第一道：特征值简并判据

近球形空洞的位置二阶矩张量特征值近简并，此时“最大特征向量”由噪声主导而非几何主导。冻结条款：

- 计算位置二阶矩张量特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 及蒙特卡洛重采样不确定度；
- 若 $\lambda_2/\lambda_1 > 0.9$ （重采样中位数），判定主轴不可分辨，检验终止，记“方向未定义”；
- 若 $0.85 < \lambda_2/\lambda_1 \leq 0.9$ ，主轴可用但须在报告中标注“弱分辨”并给出方向不确定度圆锥；
- $\lambda_2/\lambda_1 \leq 0.85$ 为主轴健康。

形态学注（冻结）： λ_2/λ_1 同时是形态学量——可分辨伸长 (≤ 0.85) 与管状通道图像相容，近球形 (> 0.9) 与弛豫静态空洞图像相容。该判据的结论及其形态学含义须写入最终报告，不因方向性检验终止而省略。

第二道：参考轴几何病态防护

本框架的前提是观测者处于空洞内部、接近中心，因此 $\hat{v}_c$ 天然病态：中心位置的估计误差会被近距几何放大为巨大的角度不确定度。冻结条款：

- 用蒙特卡洛重采样估计 $\hat{v}_c$ 的误差圆锥半角 σ_c ；
- 若 $\sigma_c > 30^\circ$ ，则 $\hat{v}_c$ 仅作参考记录，主检验一律使用 $\hat{v}_a$ ；
- 若 $\hat{v}_a$ 与 $\hat{v}_c$ 角距 $> 45^\circ$ ，报告中必须讨论该不一致（它本身携带空洞形态信息）。

第三道：伪独立性门槛

分别对 $\hat{v}_a$ 与 $\hat{v}_c$ 检查其与 CMB 运动学偶极方向的角距：

1. 若 $\hat{v}_a$ 通过伪独立性检查（角距 $\geq 15^\circ$ ）：检验以 $\hat{v}_a$ 为主检验轴执行；
2. **镜像条款**：若 $\hat{v}_a$ 越限（角距 $< 15^\circ$ ）而 $\hat{v}_c$ 通过伪独立性检查、且同时通过几何健康检查（ $\sigma_c \leq 30^\circ$ ），检验以 $\hat{v}_c$ 为备选主检验轴执行，结果降为“次级通过”，最终报告必须注明“参考轴通过、主轴失效”；两个门槛（伪独立性+几何健康）缺一不可，不允许扶正一个已知病态的轴；
3. 若两轴均越限，或 $\hat{v}_a$ 越限且 $\hat{v}_c$ 未通过几何健康检查，检验终止，记“方向未定义”。

3.4 冻结协议

- 两轴与特征值比由独立协作者在检验开始前计算；
- 数值写入本文件附件 A；
- md5 哈希存档；
- 检验全程不可更改。

4 P-1 检验协议

4.1 预测

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} = \frac{H_0(\hat{v}) - H_0(\hat{v}_\perp)}{H_0} \geq 0.003 \quad (1)$$

其中 $\hat{v}$ 为 §2.3 确定的主检验轴（ $\hat{v}_a$ 或备选 $\hat{v}_c$ ）。

（单侧下限。幅度上限 0.005 作为一致性参考，不构成通过条件；见 §3.6。）

4.2 数据

4.3 双轨检验

轨道 A：定向检验。沿冻结主检验轴 $\hat{v}$ ，将其 $\pm 30^\circ$ 天区内的超新星作为“轴向子样本”；垂直天区为“对照子样本”。分别拟合 H_0 ，计算 $\Delta H_0/H_0$ 。

表 1: P-1 检验数据集

数据集	用途
Pantheon+ Ia 型超新星	方向子样本哈勃图
SH0ES 局域距离梯	距离校准
Tully–Fisher 巡天 (CosmicFlows-4)	独立距离指示器

轨道 B：全天空盲扫。将全天空按 HEALPix $N_{\text{side}} = 4$ 划分为 768 个方向，在每个方向重复轨道 A 的拟合，对 $H_0(\hat{n})$ 做偶极拟合：

$$H_0(\hat{n}) = H_0^{\text{mean}} [1 + A_d(\hat{n} \cdot \hat{d})] \quad (2)$$

同时报告 A_d^{max} 、 $\hat{d}^{\text{max}}$ ，以及 $\hat{d}^{\text{max}}$ 与 $\hat{v}$ 的角距。

两轨结果必须在同一报告中同时给出，不允许只报告其一。

最小样本量条款（冻结）：

1. 分析前按冻结轴计算两帽内超新星计数 N_{cap} ；
2. 若任一帽 $N_{\text{cap}} < 500$ （冻结惯例阈值，非物理推导），定向轨道（轨道 A）记“功效不足”，不作判定，仅报告上限；盲扫轨道（轨道 B）照常执行并报告；
3. N_{cap} 与功效计算过程写入最终报告。

4.4 灵敏度条款（限期判决制）

在执行任何新检验之前，查明现有数据的灵敏度 σ_{H_0}/H_0 ：

1. 若灵敏度 > 0.002 ，P-1 进入正式检验；
2. 若灵敏度 ≤ 0.002 ，P-1 记“不可判决”，进入冻结等待状态，截止期限为 LSST 首年超新星样本公开（预设 2029-12-31）；
3. 逾期末获判决，P-1 失效（lapse）：不计通过、不计物理判负，但框架的方向性预言资格自逾期之日起暂停，直至判决完成。

理由：仪器灵敏度不足不构成对物理预测的反驳，但“等待更好数据”不得成为无限期缓冲。判决只有三种终态：通过、物理判负、逾期失效——不存在永久的“不可判决”。

4.5 误差预算与系统误差控制（分析前固定）

- **已知误差结构：**Pantheon+ 全样本 H_0 统计误差约 1% 量级；半球分组后样本减半，单半球误差约 1.4%； Δ 的统计灵敏度边界约 0.5%–1%，当前数据大概率只能给出上限——本方案不夸大现有数据的判决力；
- **分析前必须固定：**造父变星定标方案、测光系统差处理、红移窗口（ $0.023 < z < 0.15$ 局部膨胀层）、样本剔除规则；
- 上述任何一项在分析中途修改，须重新预注册并留版本记录，此前结果作废；
- **超新星通道与 Tully–Fisher 通道结果互验：**单通道结果不单独构成判定。

4.6 正式判据

表 2: P-1 判定矩阵

结果	判定
$\Delta H_0/H_0 \geq 0.003$, 且盲扫最优方向 $\hat{d}^{\max}$ 与 $\hat{v}$ 角距 $\leq 20^\circ$	P-1 通过（若以 $\hat{v}_c$ 执行则记次级通过）
$\Delta H_0/H_0 > 0.005$ 且方向一致	超幅阳性 : P-1 方向性通过，框架须解释幅度偏差，但不判负
盲扫 $A_d^{\max}$ 显著超过 3σ ，但 $\hat{d}^{\max}$ 与 $\hat{v}$ 角距 $> 20^\circ$	P-1 失败（各向异性存在但不指向空洞轴）
$\Delta H_0/H_0 < 0.001$ ，且盲扫无 3σ 以上信号	P-1 物理判负
灵敏度 ≤ 0.002 或帽内样本不足	不可判决 / 功效不足，转入相应分支

符号声明（冻结）: P-1 以幅度 + 方向为判据，符号开放。指示性（非冻结）预期：空洞球形化动力学意味长轴方向外流较弱，顺轴 H_0 预期略低于垂直方向；该预期不进入判定。

5 P-2 检验协议

5.1 预测

CMB 与星系计数数据中的非运动学残余偶极方向，应分别与主检验轴 $\hat{v}$ 的角距小于 20° 。

5.2 数据

表 3: P-2 检验数据集

数据集	用途
Planck 2018 全天图	CMB 偶极
CatWISE 类星体样本	计数偶极
NVSS / SUMSS 射电星系	独立计数偶极

5.3 检验步骤

1. 从 Planck 数据中扣除太阳系运动学偶极；
2. 从 CatWISE 与 NVSS 数据中扣除同一运动学偶极；
3. 分别对三个残差场做偶极拟合，获得残余方向后验分布 $\hat{r}_{\text{CMB}}$ 、 $\hat{r}_{\text{CatWISE}}$ 、 $\hat{r}_{\text{NVSS}}$ 。

5.4 统计判据（冻结）

- 角距阈值: $\theta_{\max} = 20^\circ$ ；
- 通过线: 联合经验频率 $p < 0.05$ ；强通过线: $p < 0.01$ ；
- 不使用解析公式估计显著性；

- 零假设：含共偏结构的各向同性随机方向（见 §4.5）。

5.5 蒙特卡洛显著性检验（相关噪声共偏模型）

三组数据不完全独立：共享同一天球投影，共用同一次运动学偶极扣除，计数偶极残余可能部分继承 CMB 偶极扣除的系统误差。若按独立三元组生成零假设，会高估有效样本数、低估 p 值。因此零假设必须显式含共偏结构。

第一步：冻结共偏角估计器（揭盲前完成）。共享系统误差角 θ_{sys} 从独立来源估计，不接触残余方向本身：

$$\theta_{\text{sys}}^2 = \theta_{\text{kin}}^2 + \theta_{\text{cal}}^2 \quad (3)$$

其中：

- θ_{kin} ：太阳系运动学偶极的参数不确定度（方向与幅度）向三个通道残余偶极的同一性传播量，由偶极扣除的协方差解析计算；
- θ_{cal} ：CatWISE 与 NVSS 天区重叠部的星表交叉定标方向协方差。

禁止使用残余方向自身的离散度估计 θ_{sys} （避免用被检验数据为被检验数据量刑）。估计器公式与代码版本在揭盲前冻结。

第二步：生成相关零假设。生成 10,000 组随机方向三元组，每组内部叠加一个共享偏转角，幅度按 θ_{sys} 抽样（各向同性基底 + 共偏扰动）。

第三步：命中判定。

- 若 $\theta_{\text{sys}} \leq 10^\circ$ ：沿用“三组中至少两组后验中位方向落入 $\hat{v}$ 的 20° 圆锥内”的判据；
- 若 $\theta_{\text{sys}} > 10^\circ$ ：判据升级为“三组全部落入”，方可计为命中。

阈值声明：升级阈值 10° 为冻结惯例值，非物理推导；选取依据为与角距阈值 $\theta_{\text{max}} = 20^\circ$ 的固定比例（1/2）。

第四步： p 值。实测命中构型与相关零假设的经验频率比较，得 p 值。通过线 $p < 0.05$ ，强通过线 $p < 0.01$ 。

约束：蒙特卡洛所用噪声模型与后验链生成工具，必须使用标准公开宇宙学代码；检验前冻结代码版本，不允许为提升显著性而自定义噪声模型。

5.6 判据

表 4: P-2 判定矩阵

结果	判定
命中构型满足 §4.5 第三步（按 θ_{sys} 分档）， 且 $p < 0.05$	P-2 通过（ $p < 0.01$ 记强通过）
未满足命中构型，或 $p \geq 0.05$	P-2 失败
残余偶极低于测量灵敏度	无结论，不计分（不判活也不判死）

6 联合失败声明与过渡期状态

6.1 联合失败声明（冻结，不可软化）

若 P-1 物理判负且 P-2 失败，则“动脉导管具有可分辨轴向”的图像被排除。框架退化为“静态空洞+高维发育叙事”，在物理上与局域空洞模型不可区分。此时框架仅保留 C-0（哈勃张力瞬态性）与 P-6（导管闭合）作为长期身份性预言，失去方向性预言能力。

若 P-1 逾期失效而 P-2 失败，框架方向性预言资格同样暂停，但不触发上述退化声明——退化必须建立在物理判负之上，而非程序性逾期之上。

6.2 过渡期状态声明（冻结）

若 P-2 通过而 P-1 处于“不可判决”状态（等待 LSST 判决，最长至 2029-12-31），则：

- 框架的方向性内容从“待检验预测”转为“部分支持的候选信号”；
- 框架在此期间不被判活，也不被判死；方向性信号的正式地位冻结；
- 任何在过渡期内引用本框架方向性内容的文本（论文、综述、科普），必须注明“P-1 待判，P-2 已通过”；
- 禁止将“部分支持的候选信号”表述为“已部分验证”。

本声明的目的：防止过渡态被反复包装为既成事实。方向性内容的最终地位由 P-1 判决唯一决定。

6.3 “次级通过”的含义预设（冻结）

若检验经镜像条款以 $\hat{v}_c$ （参考轴）执行并通过，结果记“次级通过”，其含义为：

- 原假设 H2 的主张从“空洞存在可分辨主轴”修正为“空洞存在可分辨非对称结构”；
- 最终报告必须写明：主轴判据未进入检验（原因：伪独立性越限或几何病态），方向性证据基于中心方向；
- “次级通过”在判定矩阵中按“通过”处理，但任何引用必须注明其降级性质。

7 判定矩阵（冻结）

表 5: P-1 × P-2 联合判定矩阵

P-1 \ P-2	通过	失败
通过	框架升级：方向性增量确立，进入必须被认真讨论的候选模型行列	腔室图像存活，壁方向性存疑，框架降半级
物理判负	轴向死、壁方向活：图像内部矛盾，需重大修正	触发联合失败声明，框架物理内容退场
不可判决/失效	过渡期状态 (§5.2)：候选信号冻结待判	资格暂停 + P-2 失败，框架仅余 C-0/P-6

8 执行路线与时间安排

表 6: 执行路线

阶段	内容	时间
0	冻结 $\hat{v}_a$ 、 $\hat{v}_c$ 、特征值比，写入附件 A，md5 存档	第 1 周
1	可操作性三道判据（简并 $\rightarrow$ 病态 $\rightarrow$ 伪独立性）	第 2 周
2	查明 P-1 现有数据灵敏度；冻结 θ_{sys} 估计器	第 3 周
3	若灵敏度允许，执行 P-1 双轨检验	第 4–8 周
4	执行 P-2 相关噪声蒙特卡洛检验	第 4–8 周
5	撰写结果，无论正负，负结果同权归档	第 9–12 周
6	（条件分支）若 P-1 不可判决，冻结至 LSST 首年数据	至 2029-12-31

9 结果输出格式

最终报告必须包含：

表 7: 结果输出清单

项目	内容
$\hat{v}_a / \hat{v}_c$	冻结值（4 位小数）与 md5
特征值比	λ_2/λ_1 与简并判据结论（含形态学注结论）
参考轴健康度	$\hat{v}_c$ 误差圆锥半角 σ_c 数值与病态条款判定
伪独立性角距	两轴各一，数值与判定；若走镜像分支，注明主检验轴实际取值
θ_{sys}	冻结估计值与分档判定（ $\leq 10^\circ$ / $> 10^\circ$ ）
P-1 灵敏度	数值与 §3.4 分支判定
P-1 帽内样本量	两帽 N_{cap} 与功效条款判定
P-1 双轨结果	定向与盲扫同时报告
P-2 方向角距	三组数据逐一列出
P-2 蒙特卡洛 p 值	数值（注明共偏模型已启用）
最终判定	P-1 / P-2 各自：通过 / 次级通过 / 物理判负 / 不可判决
探索性分析	若有，单独标记，不计入正式结论

附件 A：空洞参考方向冻结值

（留空，待检验开始前由独立协作者填入）

$$\hat{v}_a = (\quad , \quad , \quad)$$

$$\hat{v}_c = (\quad , \quad , \quad)$$

$$\lambda_2/\lambda_1 = \quad$$

$$\sigma_c = \quad^\circ$$

$\theta_{\text{sys}} =$ _____ °（揭盲前冻结）

md5: _____

填写日期: _____ 年 _____ 月 _____ 日

——完——